DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251222002
引用格式: 吴星星, 黄小玉, 王可忻, 等. 食品软包装中芳香族伯胺及其食品安全管理的研究与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 101–111.
WU XX, HUANG XY, WANG KX, *et al*. Research and analysis of primary aromatic amines and their food safety management in food flexible packaging [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 101–111. (in Chinese with English abstract).

食品软包装中芳香族伯胺及其食品安全管理的研究与分析

吴星星[1], 黄小玉[1], 王可忻[1], 董世蒙[1], 刘桂华[2], 邵晨杰[1*]
(1. 常州工业及消费品检验有限公司, 常州 213000; 2. 南京海关危险货物与包装检测中心, 常州 213000)

摘 要: 为全面掌握法规标准对芳香族伯胺(primary aromatic amines, PAAs)的管理要求, 剖析其在食品软包装中的潜在来源与迁移规律, 本文系统梳理了 PAAs 的应用特性、毒理危害、国内外相关法规标准及检测技术, 深入探讨其在该类包装中的来源路径及迁移机制, 并从食品接触材料全供应链视角构建系统性管控策略。研究发现, PAAs 作为偶氮染料、聚氨酯树脂等材料的关键原料, 因具有致癌与致突变毒性, 是国际公认的食品接触材料高风险物质。目前, 中国、欧盟等地区采用“总量管控+单项限量”相结合的管理模式管控其食品安全风险; 食品软包装中 PAAs 主要来源于原料中的有意或非有意添加物, 迁移量大小受材料特性、生产工艺、使用温度、接触介质等因素影响, 其迁移风险值得高度关注。因此, 企业可通过原料替代、包装结构优化、工艺调控、规范使用等措施降低 PAAs 迁移风险, 并根据终产品的预期用途开展迁移量测试以确保产品合规。此外, 本文展望了 PAAs 迁移预测模型构建、新型阻隔材料开发及检测技术升级 3 大重点研究方向, 为食品软包装行业 PAAs 的合规管理与食品安全保障提供技术支撑。

关键词: 食品软包装; 芳香族伯胺; 食品安全; 风险管理与控制

Research and analysis of primary aromatic amines and their food safety management in food flexible packaging

WU Xing-Xing[1], HUANG Xiao-Yu[1], WANG Ke-Xin[1], DONG Shi-Meng[1],
LIU Gui-Hua[2], SHAO Chen-Jie[1*]
(1. *Changzhou Industrial and Consumable Products Inspection Co*., *Ltd*., *Changzhou* 213000, *China*;
2. *Nanjing Customs Testing Center for Dangerous Goods and Packaging*, *Changzhou* 213000, *China*)

ABSTRACT: To comprehensively understand the regulatory standards for the management of primary aromatic amines (PAAs) and analyze their potential sources and migration patterns in food flexible packaging, this paper systematically reviewed the application characteristics, toxicological hazards, relevant domestic and international

收稿日期: 2025-12-22
基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2025YFSH0064)
第一作者: 吴星星(1989—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品接触材料安全合规管理。E-mail: wuxx89@163.com
***通信作者:** 邵晨杰(1988—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为食品接触材料安全合规管理。E-mail: shaochj@dptc.org

regulations and standards and detection technologies of PAAs. It further explored their sources and migration mechanisms in such packaging and proposed systematic control strategies from the perspective of the entire food contact material supply chain. The study found that PAAs, as key raw materials in substances such as azo dyes and polyurethane resins, were internationally recognized as high-risk substances in food contact materials due to their carcinogenic and mutagenic toxicity. Currently, regions such as China and the European Union adopted a “total control and individual limit” management model to regulate their food safety risks. In flexible food packaging, PAAs primarily originate from intentional or unintentional additives in raw materials, and the migration levels were influenced by multiple factors such as material properties, production processes, usage temperatures and contact media, made their migration risks a matter of significant concern. Therefore, enterprises could reduce PAAs migration risks through measures such as raw material substitution, packaging structure optimization, process control and standardized usage, and conduct migration testing based on the intended use of the final product to ensure compliance. Furthermore, this paper outlined 3 key research directions: The development of PAAs migration prediction models, the innovation of new barrier materials and the advancement of detection technologies, providing technical support for the compliance management and food safety assurance of PAAs in the flexible food packaging industry.

KEY WORDS: food flexible packaging; primary aromatic amines; food safety; risk management and control

0 引 言

食品软包装是由两种或多种性能不同的材料复合而成的食品接触材料, 在食品的防护与保鲜中发挥着关键作用, 是现代食品工业的重要组成部分[1]。芳香族伯胺(primary aromatic amines, PAAs)作为油墨、黏合剂等材料的原料, 广泛应用于软包装生产。

然而, PAAs 具有一定的致癌、致突变等危害, 部分已被国际癌症研究所(International Agency for Research on Cancer, IARC)列为 1 类人类致癌物, 可通过迁移进入食品, 对消费者健康构成威胁[2−6], 因此, 其迁移量受到国内外的严格管控[7−8]。如 2024 年, 欧盟食品与饲料快速预警系统(Rapid Alert System for Food and Feed, RASFF)对食品接触材料通报中, PAAs 相关通报共 43 项, 占比达 21.5%, 仅次于金属迁移量通报; 其中对华通报占比高达 74.4%。可见 PAAs 是通报高发项, 是欧盟食品接触材料管控重点[9], 也是我国食品接触材料管控重点。

全球食品接触材料法规日趋严苛, 但食品软包装中 PAAs 风险防控仍面临诸多挑战: (1)来源途径多样, 既有可能是原辅料自身引入, 也有可能是生产过程中引入的杂质或副产物; (2)迁移行为复杂, 迁移量大小受材料特性、生产及储存环境、实际使用条件等各环节影响[10]。现有研究在 PAAs 的毒理学[2,5,11]、单材质检测[12]、检测方法开发[13−15]、部分迁移行为[16]等方面有一定积累, 但仍在供应链追溯、多材质复合迁移分析、迁移机制、系统防控策略等方面存在不足。

为理清 PAAs 来源及迁移风险、破解系统防控难题, 本文系统梳理其应用与危害, 分析国内外法规要求, 剖析来源及迁移影响因素, 从供应链视角提出防控建议, 以期为食品软包装合规管理提供技术支撑, 保障消费者食品安全。

1 PAAs 的应用及危害

PAAs 又称初级芳香胺, 是一类分子结构中含苯环且连接氨基(-NH_2)的化合物。作为重要的化学中间体, PAAs 并不直接应用于食品接触材料成品, 而是作为原料组分或助剂间接参与食品接触材料生产, 如: 聚氨酯黏合剂的合成单体、环氧树脂等材料的性能提升固化剂、橡胶密封件的抗老化助剂、着色用偶氮染料前驱体等。

PAAs 可通过皮肤、胃肠道和呼吸道进入人体, 导致机体细胞功能和结构发生改变[3,17−18]。部分 PAAs 已被证实具有致癌性、致突变性或遗传毒性[19], 如: 对苯二胺、联苯胺易诱发膀胱癌; 另有研究发现, 某些芳香胺(如 4-氨基联苯)可诱发红斑性狼疮和药物性狼疮等自身免疫性疾病[20]。IARC 对部分 PAAs 的致癌性进行了分类, 详见表 1。

由表 1 可知, 4 种 PAAs (2-萘胺、4-氨基联苯、4,4’-二氨基二苯甲烷、联苯胺)被列为 IARC 致癌性 1 类(确证人类致癌物); 10 种(对苯二胺、间苯二胺等)为 3 类(致癌性无法分类); 其余多为 2A 类(动物确证致癌、人类可能致癌)或 2B 类(动物和人类均可能致癌)。

2 各国法规标准对 PAAs 的管理要求及检测技术

目前, 各国及地区对 PAAs 的管控主要分两类: (1)管控迁移总量。无固定物质清单, 因测试方法不同, 管控的种类和限量存在差异, 如: 我国食品接触材料 GB 4806

表 1　PAAs 致癌毒性分类汇总表

Table 1　Summary table of carcinogenic toxicity classification of PAAs

序号	分类等级	分类说明	化合物名称	CAS
1	1	确认人类致癌物有足够的证据证明对人类具有致癌性人类暴露有强有力的证据，同时在实验动物中显示出重要的致癌物特征和足够的致癌性证据	4,4’-次甲基-双-(2-氯苯胺)	101-14-4
2			2-萘胺	91-59-8
3			4-氨基联苯	92-67-1
4			联苯胺	92-87-5
5	2A	对人类致癌的可能性较高动物实验中发现充分的致癌性证据，对人体虽有理论上的致癌性，但实验证据有限	邻甲苯胺	95-53-4
6			4-氯邻甲苯胺	95-69-2
7	2B	对人类可能致癌; 这类物质的流行病学数据不足，但动物实验显示出致癌性，或流行病学数 据有限且动物数据不足	4,4’-二氨基二苯甲烷	101-77-9
8			4,4’-二氨基二苯醚	101-80-4
9			对氯苯胺	106-47-8
10			3,3’-二甲氧基联苯胺	119-90-4
11			3,3’-二甲基联苯胺	119-93-7
12			3-氨基对甲苯甲醚 (2-甲氧基-5-甲基苯胺)	120-71-8
13			4,4’-二氨基二苯硫醚	139-65-1
14			对氨基偶氮苯	60-09-3
15			2,4-二氨基苯甲醚	615-05-4
16			3,3’-二甲基-4,4’-二氨基二苯甲烷	838-88-0
17			邻甲氧基苯胺	90-04-0
18			3,3’-二氯联苯胺	91-94-1
19			2,4-二氨基甲苯	95-80-7
20			邻氨基偶氮甲苯	97-56-3
21			2,6-二甲基苯胺	87-62-7
22	3	对人的致癌性尚无法分类; 这类物质的数据不足，无法对其致癌性进行分类	2,4,5-三甲基苯胺	137-17-7
23			2-氨基-4-硝基甲苯	99-55-8
24			间苯二胺	108-45-2
25			对苯二胺	106-50-3
26			苯胺	62-53-3
27			2,4-二甲基苯胺	95-68-1
28			4,4’-磺酰基双苯胺	80-08-0
29			对甲氧基苯胺	104-94-9
30			1,5-二氨基萘(1,5-萘二胺)	2243-62-1
31			均三甲基苯胺	88-05-1

系列明确 PAAs 迁移总量不得检出，欧盟(EU) No 10/2011 法规(简称: 欧盟 10 号法规)要求总量不得检出。(2)管控单个 PAAs，如: 我国 GB 9685—2016《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用添加剂使用标准》及其第 1 号修改单和欧盟 10 号法规均有单个 PAAs 的管控要求。欧盟 Res AP (92) 2《关于预期接触食品的塑料材料和制品用聚合助剂》决议、日本油墨协会负清单等还对高风险特定 PAAs 限制使用。

2.1　PAAs 管理要求

2.1.1　中　国

中国采用“总量控制+单项限量控制”的方式管控食品接触材料中的 PAAs。GB 4806 系列多项标准在通用理化指标中明确，PAAs 迁移总量不得检出[检出限(limit of detection, LOD)为 0.01 mg/kg]，按 GB 31604.52—2021《食品安全国家标准 食品接触材料及制品 芳香族伯胺迁移量的测定》进行检测，共包括 29 种 PAAs。部分树脂限定 1,3-苯二胺迁移量不得检出(LOD 为 0.002 mg/kg)。GB 9685—2016 及其第 1 号修改单规定，着色剂中 PAAs(以苯胺计)残留不超过 0.05%，其中对二氨基联苯、*β*-萘胺和 4-氨基联苯 3 种物质总和不超过 0.001%；涂料添加剂 4,4’-亚甲基双苯胺迁移不得检出(LOD 为 0.002 mg/kg)。中国食品接触材料中 PAAs 的具体管控情况，详见表 2。

表 2 中国关于食品接触材料中 PAAs 的管控情况

Table 2 Control situation of PAAs in food contact materials in China

管理方式	材质	标准	项目	限量	备注
总量控制	塑料	GB 4806.7—2023《食品安全国家标准 食品接触用塑料材料及制品》	PAAs 迁移总量	ND (SML, LOD=0.01 mg/kg)	仅适用于含有可能产生 PAAs 类物质的食品接触材料, 相关食品安全标准及公告中规定了迁移限量的 PAAs, 其限量按照相关规定执行
	涂料及涂层	GB 4806.10—2025《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用涂料及涂层》			
	橡胶	GB 4806.11—2023《食品安全国家标准 食品接触用橡胶材料及制品》			
	油墨	GB 4806.14—2023《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用油墨》			
	黏合剂	GB 4806.15—2024《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用黏合剂》			
	塑料、涂料及涂层、橡胶、油墨、黏合剂、纸和纸板	GB 9685—2016《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用添加剂使用标准》及其第 1 号修改单	PAAs(以苯胺计)	≤0.05%	针对着色剂纯度的要求(非有意添加的 PAAs)
			对二氨基联苯、β-萘胺和 4-氨基联苯 3 种物质总和	≤0.001%	
	硅橡胶	GB 9685—2008《食品容器、包装材料用添加剂使用卫生标准》	PAAs	≤0.05%	
			对二氨基联苯、β-萘胺和 4-氨基联苯 3 种物质各自或总和	≤0.001%	
单独限量控制	塑料	GB 4806.7—2023《食品安全国家标准 食品接触用塑料材料及制品》	1,3-苯二胺(作为 33 号、38 号、39 号树脂的限制性要求)	33 号树脂要求: ND (SML, LOD=0.01 mg/kg); 38 和 39 号树脂要求: ND (SML, LOD=0.002 mg/kg)	针对有意添加的 PAAs 要求
			4,4'-磺酰基双苯胺(作为第 34 号树脂的限制性要求)	5 mg/kg (SML)	
		GB 9685—2016 及其第 1 号修改单	2-氨基苯甲酰胺	0.05 mg/kg (SML)	
	涂料及涂层	GB 4806.10—2025《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用涂料及涂层》	1,3-苯二胺迁移量(作为第 66 号、72 号、73 号基础原料的限制性要求)	ND (SML, LOD=0.002 mg/kg)	
			4,4'-磺酰基双苯胺(作为第 67 号基础原料的限制性要求)	5 mg/kg (SML)	
		GB 9685—2016 及其第 1 号修改单	4,4'-亚甲基双苯胺	ND (SML, LOD=0.002 mg/kg)	
	橡胶	GB 9685—2016 及其第 1 号修改单	间苯二胺	ND (SML, LOD=0.01 mg/kg)	
	硅橡胶	GB 9685—2008	间苯二胺	ND (SML, LOD=0.02 mg/kg)	

注: ND 为不得检出, SML 为特定物质迁移限量(specific migration limit)。

2.1.2　欧　盟

欧盟与我国类似, 采用“总量控制+单项限量控制”管控食品接触材料中 PAAs。通过框架法规通用要求、专项法规技术要求, 防控 PAAs 迁移风险。欧盟(EC) No 1935/2004《关于预期接触食品的材料和制品》作为食品接触材料安全管理的核心法规, 确立了“不得迁移危害健康”的原则; 欧盟 10 号法规经(EU)2020/1245 修订案衔接(EC) No 1907/2006《化学品注册, 评估, 授权和限制》(registration, evaluation, authorization and restriction of chemicals, REACH)附录 XVII 后, 明确: REACH 附录 XVII 第 43 条列出的 22 种 PAAs 迁移量不得检出(LOD 为 0.002 mg/kg), 其余未规定限量的 PAAs 总量不得检出(LOD 为 0.01 mg/kg), 4 种 PAAs 按单独限量执行[4,7]。

此外, 欧盟 Res AP (92) 2 要求: PAAs 迁移总量不得检出(LOD 为 0.01 mg/kg), 且联苯胺、*β*-萘胺、4-氨基联苯不得作为聚合助剂使用。欧盟《食品接触用纸张和纸板材料及制品合规指南》规定: 列入 REACH 法规附录 XVII, 且属于(EC) No.1272/2008《关于物质和混合物分类, 标签和包装》附录VI表 3“致癌/致突变/生殖毒性 1A、1B 类”的 PAAs, 要求迁移量不得检出(LOD 为 0.002 mg/kg); PAAs 迁移总量不得检出(LOD 为 0.01 mg/kg)。

2.1.3　美　国

美国针对食品接触材料的管理, 主要通过食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)的《联邦食品药品和化妆品法》第 21 章(简称: 21 CFR)进行管理[7–8]。21 CFR 中, 部分 PAAs 可作为授权物质的原料用于生产聚合物、橡胶、涂层, 但大多数无具体限制性要求。此外, CFR 189.280《禁止用于人类食品中的物质》明确列出 4,4’-次甲基-双-(2-氯苯胺), 规定其禁止有意使用且含量不得检出。

2.1.4　日　本

日本针对食品接触材料主要通过《食品卫生法》、厚生劳动省第 370 号公告(简称: 370 公告)及行业自律清单的形式进行管理。《食品卫生法》明确禁止危害健康物质迁移的基本原则, 其配套的 370 公告针对合成树脂材质产品采用正面清单制度, 仅允许使用清单内包含 21 类聚合物的基础材料和相关添加剂, 部分 PAAs 列入正面清单[8]。同时, 日本油墨协会发布的自愿禁用物质清单作为行业补充, 明确列出部分 PAAs, 禁止有意用于食品接触材料用油墨生产。

2.1.5　韩　国

韩国由食品药品安全部统筹管控 PAAs, 以《食品卫生法》《食品用器具、容器和包装的标准与规范》为依据[8]。前者明确禁止食品接触材料含有毒有害物质; 后者针对 3 种高风险材质的合成树脂规定了 PAAs 迁移限量为 0.01 mg/L, 其中: 环氧树脂的管控对象为 4,4’-亚甲基二苯胺迁移量, 聚氨酯的管控对象为 4,4’-二氨基二苯甲烷迁移量, 聚酰胺材料的管控对象为 PAAs 迁移总量(以苯胺、4,4’-亚甲基二苯胺、2,4’-二胺基甲苯之和计)。

2.1.6　泰　国

泰国食品接触材料以《食品法》为基础, 公共卫生部(Ministry of Public Health, MOPH)、泰国工业标准协会(Thai Industrial Standards Institute, TISI)、食品药品监督管理局(Thailand Food and Drug Administration, Thai-FDA)等多部门协同监管。2022 年 MOPH 发布的(No.435)B.E. 2565 (2022)《塑料容器的质量或标准》中, 明确 PAAs 迁移限量: 22 种特定 PAAs 不得检出(LOD 为 0.002 mg/kg), 1,3-苯二胺(CAS: 108-45-2) LOD 同样为 0.002 mg/kg, 2-氨基苯甲酰胺(CAS: 88-68-6)和 4,4’-亚甲基二(3-氯-2,6-二乙苯胺)(CAS: 106246-33-7)迁移限量为 0.05 mg/kg, 4,4’-二氨基二苯砜(CAS: 80-08-0)迁移限量为 5 mg/kg; 除上述 26 种外, 其他 PAAs 的迁移总量不得超过 0.01 mg/kg。与欧盟 10 号法规管理要求基本保持一致。

2.2　PAAs 检测技术

PAAs 检测技术是各国法规落地与产品合规管控的核心支撑, 其方法需精准匹配法规对 LOD、管控种类及材质的要求。目前, 国内外 PAAs 检测以色谱法、色谱-质谱法为核心[3,14–15], 可实现不同基质的定量分析。现有常见检测方法详见表 3。

由表 3 所示, 现有 PAAs 检测方法具有 LOD 低、使用范围广等特点, 能够较好满足法规标准要求, 但仍需针对性优化, 如: 复合材质基质干扰性强、痕量 PAAs 前处理效率偏低等难点。

3　食品软包装中 PAAs 的来源及迁移机制

在食品软包装中, PAAs 常见于塑料、橡胶、涂料、油墨和黏合剂等材料及制品中[21–22]。以塑塑复合软包装为例, PAAs 主要来源于基础膜材、油墨、黏合剂, 其来源示意图如图 1 所示。

如图 1 所示, 食品软包装基础膜材中的生产助剂(如胺类抗氧剂苯基-B-萘胺)、残留的单体可能直接迁移或降解生成 PAAs; 黏合剂和油墨[23–24]虽然不直接与食品接触, 但其中潜在的 PAAs 可通过扩散作用迁移[25–30]至食品中。

3.1　PAAs 来源路径

如前所述, 食品接触材料中 PAAs 的来源主要分为两类: 生产过程中的有意添加物, 以及非有意添加物(副反应产物)。

3.1.1　*有意添加物残留*

我国食品接触材料采用正清单管理模式进行食品安全管控, 仅允许使用清单内基础树脂及添加剂。食品软包装在生产过程中, 为提升性能可能有意添加含芳香胺基团的化合物或助剂。如 1,3-苯二胺等用作塑料单体、环氧树脂固化剂[31], 亚硝基二苯胺等作为橡胶防老剂[32], 芳香族异氰酸酯用于聚氨酯黏合剂生产[33–36], 其在生产或使用中可能释放 PAAs[16,33,36]。如: 列于 GB 9685—2016 附表 A.1 的偶氮着色剂颜料红 112 (CAS: 6535-46-2), 生成邻甲苯胺。偶氮化合物的一般分解过程如图 2 所示。

表 3 国内外常见 PAAs 检测方法及适用范围

Table 3 Common detection methods and scope of application for PAAs abroad and domestic

国家或地区	标准/文献	检测方法	适用范围	LODs/(mg/kg)
中国	GB 31604.52—2021	液相色谱-串联质谱法	29 种 PAAs; 食品模拟物: 4%乙酸、10%乙醇、20%乙醇、50%乙醇、95%乙醇、异辛烷	0.001
	SN/T 3045—2011《出口食品接触材料 高分子材料 有害芳香胺迁移量的检测方法 高效液相色谱法》	高效液相色谱法	24 种 PAAs; 食品模拟物: 水、3%乙酸、10%乙醇、橄榄油	0.01
	SN/T 2893—2011《出口食品接触材料 高分子材料 食品模拟物中芳香族伯胺的测定 气相色谱-质谱法》	气相色谱-质谱法	26 种 PAAs; 食品模拟物: 水、3%乙酸、10%乙醇、异辛烷	0.01
	T/SA 食品接触材料 038—2023《食品接触材料 着色剂中芳香族伯胺的测定》	气相色谱-质谱法	29 种 PAAs 含量	1.0 或 2.0
欧洲	EN 17163:2019 《纸浆和纸板-通过 LC/MS/MS 法测定水提取物中的芳香族伯胺》	液相色谱-串联质谱法	23 种 PAAs; 水提取物	/
韩国	《器具、容器和包装的标准和规范》(2024.6) IV.器具及容器、包装的测试方法 2-31	液相色谱-串联质谱法	3 种 PAAs; 食品模拟物: 4%乙酸	/

注: /表示该方法无 LOD 说明。

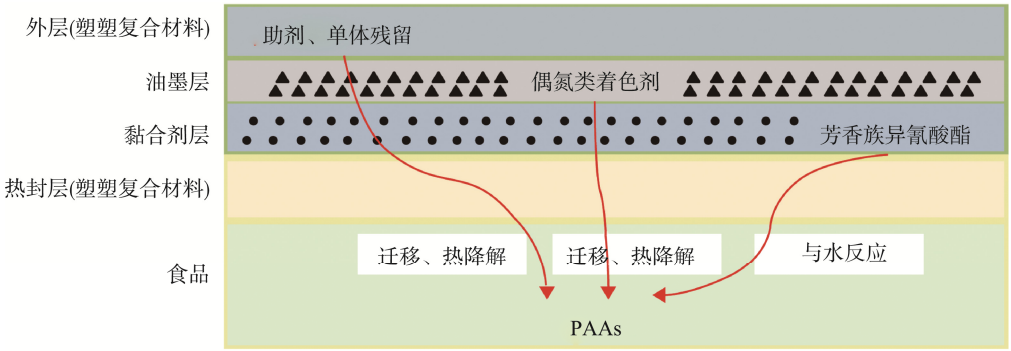
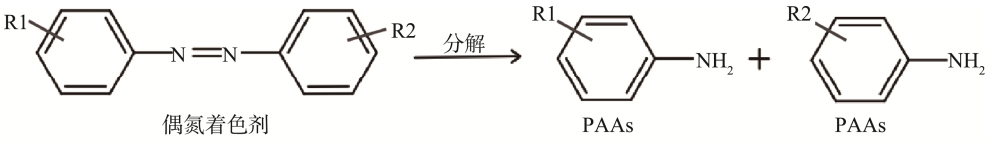


图 1 食品软包装的常见结构及其 PAAs 来源示意图

Fig.1 Schematic diagram of common structures of food flexible packaging and their PAAs sources



注: R1、R2 为苯环上发生取代反应的化学基团。

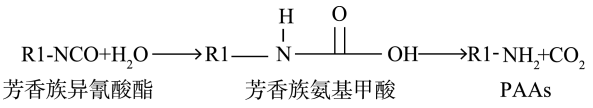
图 2 偶氮化合物分解过程一般示意图

Fig.2 General schematic diagram of the decomposition process of azo compounds

3.1.2 非有意添加物引入

非有意添加物(non-intentionally added substance, NIAS)是指在原料生产、包装加工、储存运输或使用过程中, 通过化学反应、污染、降解等非主动添加途径进入材料的物质, 具有来源复杂、种类未知等特点, 给食品接触材料安全评估及风险管理带来了巨大挑战[37]。尽管食品软包装涵盖塑料、纸、涂料、油墨、黏合剂等多种材质, 涉及化学物质较多[38], 但在我国食品接触材料正清单管理模式的约束下, 非有意添加的 PAAs 的来源相对明确: (1)芳香族异氰酸酯水解生成; (2)偶氮类着色剂反应分解生成。

芳香族异氰酸酯是聚氨酯的重要单体, 如: 甲苯二异氰酸酯和二苯基甲烷二异氰酸酯, 其残留在食品软包装中将会水解产生 PAAs[39–40], 水解示意图如图 3 所示。



注: R1 为带有苯环的化学基团。

图 3　芳香族异氰酸酯水解一般示意图

Fig.3　General schematic diagram of the hydrolysis of aromatic isocyanates

塑料、油墨等食品接触材料常用偶氮染料作为着色剂，生产中受高温及还原剂影响，可能裂解出一种或多种 PAAs[31]。如，黑色尼龙餐具因黑色偶氮着色剂常被检出含有 PAAs[41]。据报道[42]，仅 2025 年欧盟 RASFF 通报我国食品接触材料不合格数量 22 次，其中 PAAs 迁移量不合格占比 30%，且尼龙产品通报项目均与 PAAs 相关[43–44]。

3.2　PAAs 迁移机制及影响因素

迁移量水平直接关联食品安全风险。PAAs 的迁移过程本质是分子在包装材料与食品介质间的扩散行为，遵循菲克(Fick)扩散定律，迁移路径与动力学特性是其迁移量影响的关键[10]。

(1)分子迁移路径。PAAs 在包装材料中的迁移以分子链间隙扩散为主要形式，其扩散轨迹与包装结构密切相关。对于多层复合软包装，非食品接触层(如油墨层、黏合剂层)中的 PAAs，需依次穿透各基材层才能抵达食品接触面，迁移路径长度及基材自身阻隔性能，共同决定了最终迁移效率与迁移量[45]。以典型复合结构为例，聚对苯二甲酸乙二醇酯/铝/聚乙烯(polyethylene terephthalate/aluminum/polyethylene，PET/Al/PE)复合膜中的铝箔层可形成物理阻隔屏障，有效阻断 PAAs 分子扩散；而无高阻隔层的 PET/PE 复合膜中，PAAs 可通过塑料基材的链段运动自由扩散，迁移风险显著升高[46]。

(2)动力学特性。PAAs 的迁移动力学过程严格遵循 Fick 扩散定律，温度是调控该过程的核心变量[45]。升温可显著提升 PAAs 分子动能，同时扩大包装材料分子间自由体积，双重作用下降低分子迁移阻力，增加迁移量。迁移介质的极性、pH，通过改变 PAAs 溶解性与材料相容性，间接影响迁移量。PAAs 的极性差异在不同迁移介质中也存在特异性迁移规律[47]。

因此，PAAs 迁移量水平并非单一因素作用的结果，而是由材料特性(致密性、阻隔性)、生产工艺及使用条件等多重因素影响形成的综合结果[48]。

4　食品软包装中 PAAs 风险控制

由前文分析可知，PAAs 的限制要求已成为我国塑料、涂层、橡胶、油墨、黏合剂等多种食品接触材料的通用理化管控指标，欧盟、日韩、美国等国家及地区也通过专项法规明确了 PAAs 的迁移量限值。

因此，基于 PAAs 来源路径与迁移机制，从食品软包装全生命周期角度出发，采用“源头防控-过程阻断-末端管控”供应链管理模式，围绕原料选择、包装设计、生产控制、储存及使用限制 4 大环节，构建全链条精准防控体系，协同保障食品安全。

4.1　原料环节

包装材料的原料往往是有害物质迁移的源头，是风险防控的核心。在原料环节可从 4 个方面进行 PAAs 风险管控。(1)从源头上选择无 PAAs 风险的各类原辅料。如：可选用无芳香族异氰酸酯单体残留的塑料基材树脂；选用脂肪族聚氨酯黏合剂替代芳香族聚氨酯黏合剂或低 PAAs 的黏合剂[49]；着色剂禁用偶氮类染料，选用无机颜料或经合规测试无 PAAs 分解风险的有机颜料。(2)建立供应商动态审核体系。要求供应商提供原料合规声明、PAAs 检测合规报告等证明材料，并定期评定供应商资质。(3)原料入库质量验证。原料入库前应进行质量验证，确保原料的质量规格(如纯度)符合采购要求。(4)实行分区储存，避免交叉污染，非有意引入 PAAs。

4.2　包装设计环节

包装结构对 PAAs 扩散路径与迁移速率起决定性作用。多层复合软包装的核心风险在于：黏合剂中的异氰酸酯单体或油墨层中的芳香胺穿透内层食品接触材料层进入食品。因此，设计环节的关键是通过物理阻隔与层间设计阻断迁移[30]，实现 PAAs 迁移的物理防护。AZNAR 等[46]采用多层材料(油墨/PET/Al/PE)进行迁移实验时发现，当油墨印刷在 PET 层外时，有害物质迁移量急剧减少。罗任杰等[47]发现：在 40 ℃测试条件下，PET/Al/PE 材料中 3 种 PAAs 的迁移量明显低于 PET/PE 材料，在 70 ℃测试条件下，两者迁移量无差异。其核心原因在于 PET/Al/PE 中间层的镀铝层在较低温度环境下(40 ℃)发挥了关键阻隔作用，而 PET/PE 为纯塑料复合结构，缺乏金属阻隔层，PAAs 可通过膜材间隙或分子链运动直接迁移至模拟液中。

在食品软包装设计环节，可从 4 个方面进行 PAAs 风险管控。(1)设计高阻隔性、低渗透性的内层材料[50]，形成阻隔性物理屏障，如：采用乙烯-乙烯醇共聚物[poly(ethylene vinyl alcohol)，EVOH]、铝箔等阻隔材料。(2)增加聚烯烃类(如聚乙烯、聚丙烯)内层的厚度，延长 PAAs 扩散路径以降低迁移速率和最终迁移量。(3)优化包装层之间的顺序，将偶氮着色剂的油墨、涂层等具有潜在 PAAs 的来源层，限定在非食品接触层。(4)针对高温杀菌、微波加热特定使用场景，选用耐热性强、不易降解的基材(如聚丙烯共聚物、改性 PET)，避免材料分解产生 PAAs。

4.3　生产环节

生产工艺对食品软包装中 PAAs 的含量具有关键影响，

其风险控制的核心是精准调控复合与固化过程，以消除生成源、促进 PAAs 衰减[51–52]。(1)优化反应条件，精确控制温度、压力、反应时间及原料配比，确保聚合反应充分，减少单体残留及水解生成 PAAs。如：聚氨酯黏合剂的生产，精确控制芳香族异氰酸酯单体与多元醇的反应比例、反应时间和温度，使其反应完全，减少残留单体水解生成 PAAs[53–54]。(2)严控熟化工艺，降低游离异氰酸酯单体的残留，如：精准把控油墨干燥/复合的温时参数，避免偶氮染料分解生成 PAAs。(3)建立严格的质量检测标准和流程，对产品进行严格检测，保障 PAAs 符合法规标准要求。

4.4 储存及使用环节

在储存和使用环节对 PAAs 迁移具有一定的诱导作用，其风险控制关键在于规避接触时间及温度、迁移介质等外部条件加剧其迁移[55–56]。官铃淇等[57–58]研究发现，随着迁移温度升高、迁移时间延长，PAAs 迁移量显著升高，且温度影响更为显著。罗任杰等[47]研究发现，高温条件下 PAAs 迁移量急剧增加，且迁移出新种类 PAAs。原因主要有 3 个：(1)温度升高会显著提升 PAAs 分子动能，增大其在包装材料内的扩散系数，加速分子扩散速率[51]。(2)高温环境增强了包装材料聚合物链段的运动能力，扩大分子间自由体积，为 PAAs 迁移提供更宽阔的通道[53]。(3)高温改善 PAAs 与材料的相容性，降低迁移阻力。上述机制共同导致高温条件下 PAAs 迁移量急剧增加，且温度的影响权重远高于时间。

迁移介质的极性、pH，对 PAAs 迁移影响显著。AZNAR 等[59]、SENDON 等[60]提出，PAAs 在酸性条件下更易迁出。罗任杰等[47]对比分析了 4 种 PAAs (2,4-二氨基苯甲醚、4,4’-二氨基二苯硫醚、3,3’-二甲氧基联苯胺、邻甲苯胺)在 4%乙酸、10%乙醇、95 乙醇的迁移规律，研究发现该 4 种 PAAs 迁出主要集中在 10%乙醇、95%乙醇中，而 4%乙酸中仅有 2,4’-二氨基二苯硫醚和 3,3’-二甲氧基联苯胺被检出。他们研究认为：PAAs 是碱性有机物，酸性条件对其迁移会产生阻碍，因此 PAAs 主要在中性模拟物和油性模拟物中迁出，在酸性模拟物中的迁出种类少，迁移量也大幅降低，同时不同 PAAs 的极性差异也使得它们在不同模拟物的迁移量有所不同。秦晓芳[61]研究发现，油墨中 3 种 PAAs (2-萘胺、对氨基偶氮苯、4-氨基联苯)在不同迁移介质中的迁移量大小为 4%乙酸大于 10%乙醇大于 95%乙醇。胡晓云等[62]研究发现，尼龙餐具中 25 种 PAAs 在 3%乙酸、95%乙醇中的迁移能力较强，在 10%乙醇和水中的迁移能力较弱。目前，食品接触材料中 PAAs 迁移量尚无统一规律，应结合实际 PAAs 类型、迁移介质等因素综合研究分析。

在储存、使用环节，相关方需各尽其责。食品接触材料生产企业应通过标签标识、符合性声明等方式准确标注使用限制条件；食品接触材料使用企业或终端消费者，应根据食品接触材料产品使用条件(温度、时间、接触食品类型)，正确储存、使用食品接触材料。通过规范储存条件和引导安全使用，可以有效阻断 PAAs 在供应链末端及消费环节的迁移诱发因素，守住食品安全最后一道防线。

5 结束语

PAAs 作为食品软包装生产的重要原料组分，具有明确致癌、致突变毒性，其迁移风险已成为国内外食品接触材料的管控焦点。PAAs 来源的复杂性与迁移量的多因素依赖性，决定了其风险防控需构建全链条管控策略。结合现有研究与行业实际需求，提出以下建议：(1)严守供应链源头防线，严格筛选低风险原辅料，建立规范化供应商审核与原料验证机制；(2)优化包装设计，通过增设有效阻隔层等方式阻断 PAAs 迁移路径；(3)精准调控生产工艺参数，减少 PAAs 非有意生成途径；(4)明确产品储存与使用规范，阻断高温、不良介质等迁移诱发因素。同时，需结合终产品预期用途，针对性开展 PAAs 迁移量检测，确保产品符合国内外法规管控要求。本研究提出的系统性防控策略，有助于提升食品软包装合规水平，为保障消费者健康提供可行的技术路径与合规实践参考。

同时，结合现有研究缺口与行业需求，未来可聚焦 3 大方向深化研究：(1)构建迁移预测模型。基于 Fick 扩散定律，整合材料特性、工艺参数、使用条件等场景，建立多因素影响下的 PAAs 迁移预测模型，实现不同场景下迁移量的精准预判，以期替代传统耗时的试验检测。(2)开发新型阻隔材料。研发低渗透性、环境友好型阻隔材料，通过调控材料微观结构，提升对 PAAs 的阻隔效率，同时满足轻量化、可降解需求，如生物基阻隔涂层[63–64]。(3)升级检测技术。针对现有检测技术操作复杂、耗时久、依赖实验室设备的短板，优化检测前处理流程，缩短分析周期；结合色谱-质谱联用技术的特异性优势，探索小型化、便携化检测设备研发，开发适配快速筛查与痕量确证一体化的检测方案，满足生产过程管控与市场快速监管需求，为食品软包装行业合规发展与消费者健康保障提供技术支撑。

参考文献

[1] 白晨艳. 浅谈食品软包装中的初级芳香胺[J]. 粘接, 2020, 41(1): 41–44.
BAI CY. Primary aromatic amine in food flexible packaging [J]. Adhesion, 2020, 41(1): 41–44.

[2] IARC Monographs Working Group. Iarc monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans volume 99 Some aromatic amines, organic dyes, and related exposures [M]. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2010.

[3] 满正印, 沈坚, 王全林, 等. 食品接触塑料中初级芳香胺检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(9): 2722–2727.
MAN ZY, SHEN J, WANG QL, *et al.* Research progress of detection methods for primary aromatic amines in foodcontact plastics [J]. Journal

of Food Safety & Quality, 2014, 5(9): 2722–2727.

[4] 吴世宏. 关于食品蒸煮袋中芳香族伯胺的法律规制[J]. 中国包装, 2024, 44(8): 24–29.
WU SH. Legal regulation on aromatic primary amines in food cooking bags [J]. China Packaging, 2024, 44(8): 24–29.

[5] DEWULF F, SEMMOURI I, VAN NIEUWERBURGH F, *et al.* Exploring mode of action for acute toxicity of primary aromatic amines with daphnia magna using differential gene expression analysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025(488): 137–377.

[6] 曹瑜, 钟泽辉, 唐聪, 等. 食品接触材料中有害物质迁移的研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(15): 112–121.
CAO Y, ZHONG ZH, TANG C, *et al.* Research progress on the migration of harmful substances in food contaet materials [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(15): 112–121.

[7] 赵有中, 刘朝阔. 国内外食品接触材料相关标准及法规[J]. 塑料包装, 2025, 35(1): 1–5.
ZHAO YZ, LIU CK. The standards & regulations of food contact materials at home and abroad [J]. Plastics Packaging, 2025, 35(1): 1–5.

[8] 王璟. 食品接触材料中初级芳香胺要求比较研究[J]. 广东化工, 2021, 48(16): 69–71.
WANG J. Study on requirements of primary aromatic amines in food contact materials [J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(16): 69–71.

[9] 国家食品接触材料检测重点实验室(常州). 2024 欧盟食品和饲料类快速预警 RASFF 通报[EB/OL]. (2025-03-04) [2025-12-18]. https://book.yunzhan365.com/bookcase/dgvq/index.html
National Key Laboratory for Testing of Food Contact Materials (Changzhou). 2024 EU food and feed rapid alert system (RASFF) notification [EB/OL]. (2025-03-04) [2025-12-18]. https://book.yunzhan365.com/bookcase/dgvq/index.html.

[10] 赵冉冉. 食品包装油墨中芳香胺的迁移研究[J]. 绿色包装, 2025(10): 42–46.
ZHAO RR. Study on the migration of aromatic amines in food packaging ink [J]. Green Packaging, 2025(10): 42–46.

[11] WANG S, HANNA D, SUGAMORI KS, *et al.* Primary aromatic amines and cancer: Novel mechanistic insights using 4-aminobiphenyl as a model carcinogen [J]. Pharmacology & Therapeutics 2019(200): 179–189.

[12] BHATTARAI B, GRØNVALD J, LUND KH, *et al.* Primary aromatic amines in paper cups, paper traws, and sausage casings [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2025, 42(10): 1435–1445.

[13] SILVA-NASCIMENTO LE, WRONA M, DA-SILVA-OLIVEIRA W, *et al.* A study on the migration of primary aromatic amines in packaged açaí-based (*Euterpe oleracea* Mart.) products [J]. Food Packaging Shelf Life, 2023(38): 101118.

[14] SZABÓ BS, JAKAB PP, HEGEDŰS J, *et al.* Determination of 24 primary aromatic amines in aqueous food simulants by combining solid phase extraction and salting-out assisted liquid–liquid extraction with liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Microchemical Journal, 2021(164): 105927.

[15] MCCALL E, KEEGAN J, FOLEY B. Primary aromatic amine migration from polyamide kitchen utensils: Method evelopment and product testing [J]. Food Addit Contamart A Chem Anal Control Expo Risk Assess, 2012, 29(1): 149–160.

[16] SANLLORENTE S, SARABIA LA, ORTIZ MC. Migration kinetics of primary aromatic amines from polyamide kitchenware: Easy and fast screening procedure using fluorescence [J]. Talanta, 2016(160): 46–55.

[17] GHENI SA, ALI MM, TA GC, *et al*. Toxicity, hazards, and safe handling of primary aromatic amines [J]. ACS Chemical Health & Safety, 2023, 31(1): 8–21.

[18] KUHNKE L, TER-LAAK A, GÖLLER AH. Reactivity descriptors for the prediction of ames mutagenicity of primary aromatic amines [J]. Journal of Chemical Information and Modeling, 2019, 59(2): 668–672.

[19] SKIPPER PL, KIM MY, SUN HL, *et al.* Monocyclic aromatic amines as potential human carcinogens: Old is new again [J]. Carcinogenesis, 2010, 31(1): 50–58.

[20] 钟金汤. 偶氮染料及其代谢产物的化学结构与毒性关系的回顾与前瞻[J]. 环境与职业医学, 2004(1): 58–62.
ZHONG JT. Review of the mutagenicity- carcito dyes and their metabolites from the perspective of their structure-activity relationships [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2004(1): 58–62.

[21] TRIER X, OKHOL B, FOVERSKOV A, *et al.* Primary aromatic amines (PAAs)in black nylon and other food-contact [J]. Food Additives and Contaminants-Part A, 2010, 27(9): 1325–1335.

[22] 施思倩, 姚卫蓉. 外卖食品接触材料中有害物质迁移研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(18): 6504–6510.
SHI SQ, YAO WR. Research progress on migration of harmful substances in takeaway food contact materials [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(18): 6504–6510.

[23] GALBIATI E, JACXSENS L, DE-MEULENAER B. Hazard prioritisation of substances in printing inks and adhesives applied to plastic food packaging [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2021, 38(9): 1608–1626.

[24] LUO RJ, LIN QB, ZHU L. *et al.* Detection of primary aromatic amines content in food packaging ink and migration from printed plastic bags [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022(32): 100820.

[25] ALAMRI MS, QASEM AAA, MOHAMED AA, *et al.* Food packaging's materials: A food safety perspective [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2021, 28(8): 4490–4499.

[26] SAMSUDIN H, AURAS R, MISHRA D, *et al.* Migration of antioxidants from polylactic acid films: A parameter estimation approach and an averview of the current mass transfer models [J]. Food Research International, 2018(103): 515–528.

[27] PAN JJ, CHEN YF, ZHENG JG, *et al.* Migration of mineral oil hydrocarbons from food contact papers into food simulants and extraction from their raw materials [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2021, 38(5): 870–880.

[28] PACK EC, JANG DY, CHA MG, *et al.* Potential for short-term migration of mineral oil hydrocarbons from coated and uncoated food contact paper and board into a fatty food simulant [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2020, 37(5): 858–868.

[29] WAN JJ, ZHANG SC, LIU LL, *et al.* Contribution of packaging materials to MOSH and POSH contamination of milk powder products during storage [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2021, 38(6): 1034–1043.

[30] 何东杰. 食品包装材料迁移对食品安全的影响及其预防措施[J]. 现代

食品, 2024, 30(12): 128–130.
HE DJ. Impact of migration of food packaging materials on food safety and its preventive measures [J]. Modern Food, 2024, 30(12): 128–130.

[31] 郑亚萍, 宁荣昌. 环氧树脂/间苯二胺体系性能研究[J]. 中国塑料, 2001(2): 26–28.
ZHENG YP, NING RC. Research on the performance of epoxy resin/m-phenylenediamine system [J]. China Plastics, 2001(2): 26–28.

[32] 王丹萍, 陈朝晖, 王迪珍, 等. 橡胶反应性防老剂[J]. 合成橡胶工业, 2008(1): 75–78.
WANG DP, CHEN CH, WANG DZ, *et al.* Rubber reactive antioxidant [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2008(1): 75–78.

[33] CAMPANELLA G, GHAANI M, QUETTI G, *et al*. On the origin of primary aromatic amines in food packaging materials [J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(1): 137–143.

[34] MALUCELLI G, PRIOLA A, FERRERO F, *et al.* Polyurethane resin based adhesives: Curing reaction and properties of cured systems [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2005, 25(1): 87–91.

[35] DIXON J. Packaging materials 9. Multilayer packaging for food and beverages [R]. ILSI Europe Report Series, 2011.

[36] 许超, 齐永润, 李晓婧, 等. 基于食品用塑料复合袋中 3 类风险监测项目的分析研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(7): 220–223.
XU C, QI YR, LI XJ, *et al.* Analysis and research on three categories of risk monitoring projects in food-use plastic composite bags [J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(7): 220–223.

[37] 魏帅, 鲍蕾. 食品接触材料中非有意添加物的检测方法[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(24): 8195–8203.
WEI S, BAO L. Analytical methods of non-intentional added substance in food contact material [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(24): 8195–8203.

[38] ZIMMERMANN L, SCHERINGER M, GEUEKE B, *et al.* Implementing the EU chemicals strategy for sustainability: The case of food contact chemicals of concern [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022(437): 129167.

[39] 任平, 赵洁, 居莹, 等. 食品接触材料中初级芳香胺的迁移风险与法规管控[J]. 中国塑料, 2022, 36(2): 139–146.
RENG P, ZHAO J, JU Y, *et al.* Migration risk and regulatory control of primary aromatic amines in food contact materials [J]. China Plastics, 2022, 36(2): 139–146.

[40] 叶青萱. 软包装用聚氨酯胶黏剂发展近况[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2011, 9(1): 21–30, 39.
YE QX. Recent development status of polyurethane adhesives for flexible package [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2011, 9(1): 21–30, 39.

[41] ZHANG HR, YANG DY, GAO J, *et al.* Probabilistic health risk assessment of primary aromatic amines in polyamide cooking utensils in China by Monte Carlo simulation [J]. Food and Chemical Toxicology, 2024(193): 115067.

[42] 国家食品接触材料检测重点实验室(常州). 2025 上半年 RASFF 通报|对华通报分析及相关建议[EB/OL]. (2025-07-18) [2025-12-7]. https://mp.weixin.qq.com/s/hOjj81mEmR4hMrJe8WI8yw?scene=1
Nanjing Customs Dangerous Goods and Packaging Inspection Center. RASFF notification for the first half of 2025: Analysis of notifications to china and related suggestions [EB/OL]. (2025-07-18) [2025-12-07]. https://mp.weixin.qq.com/s/hOjj81mEmR4hMrJe8WI8yw?scene=1

[43] 包桂娟, 张振宇, 廖文彬, 等. 国内外聚酰胺类塑料食品接触材料的法规比较[J]. 质量与认证, 2021(1): 88–89.
BAO GJ, ZHANG ZY, LIAO WB, *et al.* Comparison of domestic and foreign regulations on polyamide plastic food contact materials [J]. China Quality Certification, 2021(1): 88–89.

[44] 张苗, 余婷婷, 艾刚好, 等. 2019—2025 年欧盟食品和饲料快速预警系统通报的中国食品安全数据分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(19): 307–316.
ZHANG M, YU TT, AI GH, *et al.* Analysis of China's food safety data reported by European Union rapid alert system for food and feed from 2019 to 2025 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(19): 307–316.

[45] ZHANG Q, HUO YX, YANG QL, *et al.* Migration of chemical substances from packaging materials to food [J]. Food Chemistry, 2025(485): 144544.

[46] AZNAR M, DOMEÑO C, NERÍN C, *et al.* Set-off of non volatile compounds from printing inks in food packaging materials and the role of lacquers to avoid migration [J]. Dyes and Pigments, 2015(114): 85–92.

[47] 罗任杰, 林勤保, 颜建伟, 等. PET/PE 复合膜中初级芳香胺及 2 种塑料添加剂的迁移研究及安全评估[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 120–128.
LUO RJ, LIN QB, YAN JW, *et al.* Migration and safety assessment of primary aromatic amines and two plastic additives from PET/PE composite films [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(15): 120–128.

[48] 任梦梦, 徐丹, 张弛, 等. 食品包装材料中有害物质迁移的研究进展[J]. 食品科技, 2025, 50(9): 327–334.
RENG MM, XU D, ZHANG C, *et al.* Research progress on the migration of harmful substances in food packaging materials [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(9): 327–334.

[49] 卫艳玲. 脂肪族和芳香族无溶剂聚氨酯复膜胶的制备及性能研究[J]. 塑料包装, 2025, 35(1): 18–21, 8
WEI YL. Preparation and properties of aliphatic and aromatic solventless polyurethane laminating adhesive [J]. Plastics Packaging, 2025, 35(1): 18–21, 8

[50] RADUSIN T, NILSEN J, LARSEN S, *et al.* Use of recycled materials as mid layer in three layered structures-new possibility in design for recycling [J]. Journal of Cleaner Production, 2020(259): 120876.

[51] BÁLINT SS, NOÉMI P, CSABAR K, *et al.* Stability study of primary aromatic amines in aqueous food simulants under storage conditions of food contact material migration studies [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022(33): 100909.

[52] 田立云. 软包装复合用无溶剂型聚氨酯胶粘剂中的初级芳香胺迁移量研究[C]. 北京: 粘接学会第 30 届学术年会暨绿色建筑胶粘剂论坛暨第五届京津冀粘接技术研讨会. 北京高盟新材料股份有限公司, 2021.
TIAN LY. Research on the migration of primary aromatic amines in solvent-free polyurethane adhesives for flexible packaging lamination [C]. Beijing: The 30th Academic Annual Conference of Beijing Adhesive Society and Green Building Adhesive Forum and the 5th Beijing-Tianjin-Hebei Adhesive Technology Seminar. Beijing Gaomeng New Materials Co., LTD., 2021.

[53] 张文. 食品包装用聚氨酯粘合剂的使用风险与安全管控措施[J]. 粘接, 2024, 51(1): 19–21.
ZHANG W. Use risk and safety management of polyurethane adhesive for food packaging [J]. Adhesion, 2024, 51(1): 19–21.

[54] 崔雪霞. 甲苯二氨基甲酸酯催化分解合成甲苯二异氰酸酯反应研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
CUI XX. Research on the catalytic decomposition of toluene diisocyanate from toluene diaminocarbamate [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.

[55] PANDISELVAM R, AYDAR AY, KUTLU N, *et al.* Individual and interactive effect of ultrasound pre-treatment on drying kinetics and biochemical qualities of food: A critical review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023(92): 106261.

[56] BRANDSCH R, PEMBERTON M, SCHUSTER D, *et al.* Impact of partitioning in short-term food contact applications focused on polymers in support of migration modelling and exposure risk assessment [J]. Molecules, 2021, 27(1): 121.

[57] 官铃淇, 蔡翔宇, 陈璐, 等. 聚酰胺/聚丙烯蒸煮袋中2,4-二氨基甲苯和4,4’-二氨基二苯甲烷向酸性食品模拟物的迁移分析[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 292–298.
GUAN LQ, CAI XY, CHEN L, *et al.* Analysis of the migration of 2,4-diaminotoluene and 4,4’-diaminodiphenylmethane from polyamide/polypropylene retort pouches to acidic food simulants [J]. Food Science, 2021, 42(20): 292–298.

[58] 官铃淇, 蔡翔宇, 陈璐, 等. PA/CPP 蒸煮袋中初级芳香胺迁移量的测定及其影响因素[J]. 分析测试学报, 2021, 40(11): 1604–1610.
GUAN LQ, CAI XY, CHEN L, *et al.* Determination and influencing factors of migration of primary aromatic amines in pa/cpp retort pouch [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2021, 40(11): 1604–1610.

[59] AZNAR M, CANELLAS E, NERÍN C. Quantitative determination of 22 primary aromatic amines by cationexchange solid-phase extraction and liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography, 2009, 1216(27): 5176–5181.

[60] SENDON R, BUSTOS J, SANCHEZ JJ, *et al.* Validation of a liquid chromatography-mass spectrometry method for determining the migration of primary aromatic amines from cooking utensils and its application to actual samples [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2010, 27(1): 107–117.

[61] 秦晓芳. 油墨中芳香胺在食品包装膜中的迁移研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
QIN XF. Research on the migration of aromatic amines in ink to food packaging films [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018.

[62] 胡晓云, 王磊, 张阿惜, 等. 气相色谱-双质谱联用法同时测定尼龙餐具中 25 种初级芳香胺的迁移量[J]. 分析试验室, 2019, 38(1): 72–78.
HU XY, WANG L, ZHANG AX, *et al.* Simultaneous determination of migration amount for 25 primary aromatic amines in nylon tableware by GC/MS-MS [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2019, 38(1): 72–78.

[63] 郭婉婷, 张瑞, 乌日娜, 等. 食品包装纸用生物基防油涂层的应用研究进展[J]. 造纸与纤维材料, 2025, 47(3): 1–7.
GUO WT, ZHANG R, WU RN, *et al.* Research progress on the application of bio-based oil-resistant coatings for food packaging paper [J]. Paper Making and Fiber Materials, 2025, 47(3): 1–7.

[64] 钟韵嫦, 朱洪涛, 潘建辉, 等. 纸张用生物基无氟防水防油涂层的制备与性能研究[J]. 离子交换与吸附, 2025, 41(5): 372–378.
ZHONG YC, ZHU HT, PAN JH, *et al.* Fabrication and characterization of bio-based fluorine-free water-and oil-resistant coating for paper [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2025, 41(5): 372–378.

(责任编辑：蔡世佳　韩晓红)